

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01600

研究課題名(和文) 漏気の影響を考慮した空気循環系におけるトレーサガス実験法の開発

研究課題名(英文) Development of tracer gas experimental method in air recirculating system considering the effect of leakage

研究代表者

倉淵 隆 (Kurabuchi, Takashi)

東京理科大学・工学部建築学科・教授

研究者番号：70178094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：トレーサガス実験の空気齢測定について、実際に使用される居室への拡張を行うために、居室を模擬した空間での空気齢測定による循環系と開放系の対応を確認した。その後、空調機と空気清浄機が稼働する居室における定常濃度分布と空気齢分布の測定を試みた。完全混合に近い空間を対象とした実測が一樣分布となることを踏まえ、空調機と空気清浄機それぞれが稼働する大空間での実測を実施した。CFDとの比較は、概ね対応は見られたことから空調機、空気清浄機が稼働する居室における空気齢測定が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで換気効率の評価は、外部との給排気のある開放系において、新鮮外気や汚染空気の挙動をトレーサガスで模擬して実施するものであった。これに対し、本研究ではビル用マルチエアコンや空気清浄機など、空気が装置を通過はするが外部との給排気がなく、室内を循環する系において空調空気の分配や処理前の汚染空気の滞留状況の把握に適用できる換気効率測定法の開発を目指すものであり、動的定常状態という濃度変化の状態を応用する。循環系を対象としたトレーサガス実験法の提案は国内外で例を見ないものであり、また循環部ソース単独発生の場合の動的定常濃度が空気齢に対応することから、空気齢の迅速測定法としての応用も期待される。

研究成果の概要(英文)：Regarding the air age measurement of the tracer gas experiment, we confirmed the correspondence between the circulatory system and the open system by measuring the air age in a space simulating the living room in order to expand it to the living room actually used. After that, we tried to measure the steady concentration distribution and air age distribution in the living room where the air conditioner and air purifier are operating. Based on the fact that the actual measurement for a space close to complete mixing last year has a uniform distribution, the actual measurement was carried out in a large space where each of the air conditioner and the air purifier operates. As for the comparison with CFD, since the correspondence was generally seen, it became possible to measure the air age in the living room where the air conditioner and air purifier are operating.

研究分野：建築空気環境・換気設備

キーワード：トレーサガス実験法 空気齢 動的定常濃度 循環系 開放系 漏気 CFD 空気齢測定

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

従来の換気効率の評価は、対象となる室が外気を導入し、室空気が排除される開放系であることを前提に、トレーサガスを用いて新鮮外気の分配効率や室内発生汚染質の滞留状況を調べるものであった。しかし、実際にはビル用マルチエアコンなど換気機能のない空調機からの空調空気の分配効率や喫煙室で室内空気がエアフィルターを循環する条件での粉じんの滞留状況など、原則として換気が行われない室内における室内空気の状況を調べるニーズも少なくない。

### 2. 研究の目的

このような循環系における換気効率評価のためには、室への給気と排気を人工的に分離した等価な開放系の実験環境を設定して換気効率実験を行うか、CFDによる計算予測を実施するか現状では検討方法がない。本研究ではこのような循環系における換気効率の測定法の開発を目指すものである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 空気循環系実験室の整備

開放系と空気循環系の切り替えと漏気量のコントロールが可能な実験室の整備を行う。現有の恒温恒湿室は空調系に特別な気密対策を行っていないことから、空調定格風量時に1.0回/h程度の漏気が確認されるなど、漏気量のコントロールが困難である。そこで既存の空調系とは別に、漏気系統(OA, EA)と循環運転と全外気運転をダンパ切り替えで構成することができる空調系統(SA, RA)の増設を実施したが、その調整と運用方法の確立、及び必要に応じて改良を実施する。また、現状では空調系統とは言っても、等温条件の実験のみが可能であり、ビル用マルチエアコンなどの空調システムの換気効率の実験を実施することができない。そこで、既存の熱源を生かしたAHUの設計と設置を行い、空調実験のための実験室整備を実施する。

#### (2) センサアレイ測定システムの製作

動的定常濃度測定には時間変化する空間濃度の同時測定が必要となる。このために比較的安価な半導体CO<sub>2</sub>センサによるセンサアレイ測定システムを想定している。現状で市販の半導体センサには何種類もあり、代表的機種を求めて赤外線ガス分析計の測定値とのクロスチェックによる精度確認や応答性比較を行い、本研究の目的に最も合致するセンサを見極める。半導体センサはパッシブサンプリングによる濃度測定が一般的であるが、小型ポンプによるアクティブサンプリングとすることによって、応答性が大きく改善される可能性がある。選定したセンサを用いたセンサアレイを作成し、既存のリアルタイムガスモニター等を利用した高精度ポイント測定装置との比較に基づき、測定精度を確認した上で、動的定常濃度分布測定システムを確立する。

#### (3) 実験プロトコルの確立

実験室の整備と並行して実験プロトコル確立のための検討を実施する。等温条件とし、漏気を極限まで抑制した条件と、循環換気量の一定割合を漏気が占める条件について検討し、その後非等温条件への展開を試みる。実験的に解明を要するのは、まず、動的定常濃度到達時点をどの時定数で判定するか、またその判定基準の確立が必要となる。事前のCFD検討によれば、循環換気量に関する名目換気時間程度と比較的短時間となることが予想されるが、そもそも循環系における濃度分布確立にこの時定数を用いてよいか検討を要する。循環部ソース単独の場合の動的定常濃度を空気齢とみなす際の判断基準についても同様の検討を要する。次に、漏気が無視できない条件での動的定常濃度の合成には、室内ソース、循環部ソース単独の場合に漏出濃度が等しいか、室内平均濃度の変化率が等しい条件のデータを抽出する必要があり、適切な方法について検討する。また、動的定常濃度の合成結果には長周期の変動成分が含まれることが予想され、不要な成分を除去するフィルタリング手法についても検討を進める。

#### (4) 空気循環系機器を有する室内における換気効率測定

確立された実験プロトコルにより、空気循環系機器を有するさまざまな室内を実験室にて想定し、換気効率の測定データの収集を試みると同時に、空気循環系とみなせる実空間を対象とした現場実測を試みる。研究代表者の監督のもと、研究分担者と連携研究者及び大学院生が協力してこの課題に取り組み、空気循環系における換気効率評価方法の実績データと測定方法に関する知見を蓄積して公表する。

### 4. 研究成果

#### (1) 高応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法

研究で展開する実験理論の妥当性を確認するために開放系、循環系、循環系において漏気量のコントロールが可能な環境試験室へ既存の実験室への機能追加を行った。また、二酸化炭素の非定常濃度測定に適用できる濃度測定機器の製作をメーカーに依頼し、応答速度10秒程度の高応答性機器に基づく測定システムを構築した。そこで、従来よりも応答性に優れた濃度測定機器を使用することによる空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法の適用性の改

善効果について従来の濃度測定器と新しく用いた高応答性機器を用いることによって測定した動的定常濃度の合成によって得られる濃度分布と等価な開放系の濃度分布を比較し、従来の濃度測定器と新しく用いた高応答性機器による測定精度を検討することで、同一形状のセンサー（出力周波数は異なる）を用いた濃度測定機器であってもサンプリング法を従来のパッシブ法から今回新たに用いたアクティブ法に変更すると応答性の著しい向上が認められることが示された。また、動的定常濃度を用いたトレーサガス実験を精度良く実施するためには、応答性の高い測定機器が求められることが示された。そして、理論的検討によって示されていた漏気のない条件において、動的定常濃度の合成によって得られる濃度分布が等価な開放系の濃度分布と対応することが実験室実験及びCFD解析によって示された。

次に、動的定常濃度の理論より、循環系循環部ソース単独の動的定常濃度分布は理論的に開放系によって測定される空気齢分布と対応することを従来の濃度測定器と新しく用いた高応答性機器により検討することで、高応答性機器による測定は従来機器の測定と比べてよく対応することが示されたとともに、漏気のない条件において循環系循環部ソース単独の動的定常濃度分布は理論的に空気齢分布と対応することが実験室実験及びCFD解析によって示された。

## (2) 漏気のある空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法

研究成果の(1)に記したように、漏気のない条件において理論的検討によって示されていた動的定常濃度の合成によって得られる濃度分布が、等価な開放系の濃度分布と対応すること、及び循環系循環部ソース単独の動的定常濃度分布は理論的に空気齢分布と対応することが実験室実験及びCFD解析によって示された。以上の結果を踏まえ、より一般的なケースとして想定される室内発生が循環部に加えて漏気によっても除去される条件における理論的検討を行い、その理論においても開放系における室内ソースによる定常濃度分布は、等価な空気循環系における動的定常濃度の合成によって得られる濃度分布と対応すること、さらに循環部ソース単独の場合の動的定常濃度は空気齢を表すことが示された。よって、上記の理論的検討を実験室におけるトレーサガス実験及びCFD解析によって確認するため、発生方法、発生位置、漏気量をそれぞれ変えて検討を行い理論的検討が実験室実験及びCFD解析によっても成立することが確認できた。また、漏気のある循環系循環部発生の動的定常濃度は循環換気量に対する名目換気時間前後で濃度測定を実施することにより空気齢測定が可能となることも示された。

## (3) 動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法を用いた実空間での空気齢分布測定

研究成果(1)、(2)にも示したように実験室実験に及びCFD解析によって、動的定常濃度を用いた漏気を伴う換気のない室におけるトレーサガス実験法が成立することが示された。以上の結果を踏まえ、空気齢測定の拡張として、実際に使用される居室を模擬した空間での妥当性を得て、その上で実際の循環系の代表ともいえるビル用マルチ空調機や空気清浄機が稼働する室において、定常濃度分布と空気齢分布の測定を試みた。実際に使用される居室では開放系との対応による妥当性は、実測による再現は不可能であるためCFDで行い、概ね対応は見られたことから空調機、空気清浄機が稼働する居室における空気齢測定が可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Naoya Ikemura, Takashi Kurabuchi, Jinya Takeuchi, Hazime Yoshino and Yoshihiro Toriumi	4. 巻 111
2. 論文標題 Fundamental Study on a Tracer Gas Experimental Method that uses Dynamic Steady State Concentration and can be Applied to an Air Recirculating System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 E3S Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 6059
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/e3sconf/201911106059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 佐藤要, 清水大暉
2. 発表標題 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法（その1） 漏気が室の質量収支に影響する場合に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水大暉, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 佐藤要
2. 発表標題 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法（その2） 定常濃度分布測定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤要, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 清水大暉
2. 発表標題 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法（その3） 空気齢測定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤要 倉淵隆 竹内仁哉 吉野一 鳥海吉弘 清水大暉
2. 発表標題 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 (その1) 漏気が室の質量収支に影響する場合に関する検討及び空気齢測定
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水大暉 倉淵隆 竹内仁哉 吉野一 鳥海吉弘 佐藤要
2. 発表標題 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 (その2) 定常濃度分布測定
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Kurabuchi, Jinya Takeuchi, Hajime Yoshino, Yoshihiro Toriumi, Kaname Sato
2. 発表標題 Dynamic steady-state concentration distribution realized in air recirculating systems with air leakage Part 1 Theoretical consideration
3. 学会等名 Roomvent 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaname Sato, Takashi Kurabuchi, Jinya Takeuchi, Hajime Yoshino, Yoshihiro Toriumi
2. 発表標題 Dynamic steady-state concentration distribution realized in air recirculating systems with leakage Part 2 Experimental verification
3. 学会等名 Roomvent 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田 実里・倉淵 隆・竹内 仁哉・吉野 一・鳥海 吉弘・池村 尚也・佐藤 要
2. 発表標題 高応答性 CO2濃度測定機器を用いた通風気流の換気効率測定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 要・倉淵 隆・竹内仁哉・吉野 一・鳥海 吉弘・池村 尚也
2. 発表標題 高応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法の検討 Part 1. 定常濃度分布測定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池村 尚也・倉淵 隆・竹内 仁哉・吉野 一・鳥海 吉弘・佐藤 要
2. 発表標題 高応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法に関する検討 Part 2. 空気齢分布測定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田実里・倉淵隆・竹内仁哉・吉野一・鳥海吉弘・池村尚也・佐藤要
2. 発表標題 高応答性CO2濃度測定機器を用いた通風気流の換気効率測定
3. 学会等名 空調調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤要・倉淵隆・竹内仁哉・吉野一・鳥海吉弘・池村尚也
2. 発表標題 高応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法に関する検討Part 1. 定常濃度分布測定
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池村尚也・倉淵隆・鳥海吉弘・吉野一・竹内仁哉・佐藤要
2. 発表標題 高応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法に関する検討 Part 2. 空気齢分布測定
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田実里 倉淵隆 竹内仁哉 吉野一 鳥海吉弘 池村尚也 佐藤要
2. 発表標題 高応答性CO2 濃度測定機器を用いた通風気流の換気効率測定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池村 尚也 倉淵 隆 竹内 仁哉 吉野 一 鳥海 吉弘
2. 発表標題 Fundamental Study on a Tracer Gas Experimental Method that uses Dynamic Steady State Concentration and can be Applied to an Air Recirculating System
3. 学会等名 CLIMA Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池村 尚也 倉渕 隆 竹内 仁哉 吉野 一 鳥海 吉弘 佐藤 要
2. 発表標題 高応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法に関する検討 Part 2. 空気齢分布測定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 要、倉渕 隆、竹内 仁也、吉野 一、鳥海 吉弘、池村 尚也
2. 発表標題 高応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法の検討 Part 1. 定常濃度分布測定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	鳥海 吉弘  (Toriumi Yoshihiro)  (90649162)	東京電機大学・理工学部・教授   (32657)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------